

Avaliação do impacto do sismo de 1969 nas escolas existentes no Algarve

João M. C. Estêvão

Departamento de Engenharia Civil, ISE, Universidade do Algarve, Portugal, jestevao@ualg.pt

Carlos Esteves

Departamento de Engenharia Civil, ISE, Universidade do Algarve, Portugal, a51467@ualg.pt

Bruno Tomás

Departamento de Engenharia Civil, ISE, Universidade do Algarve, Portugal, a44356@ualg.pt

Carlos Sousa Oliveira

CERis - Instituto Superior Técnico, Portugal, Portugal, csoliv@civil.ist.utl.pt

Resumo

O sismo de 28 de fevereiro de 1969 foi o último sismo a provocar destruição no património edificado na região do Algarve. Contudo, não foi possível registar o nível de aceleração a que os edifícios foram sujeitos nessa região. Neste contexto, é de especial importância usar os efeitos dos sismos que são conhecidos para balizar qual terá sido o nível de aceleração a que os edifícios foram sujeitos, que é um importante contributo para a definição da real perigosidade sísmica da região, e consequente risco sísmico do edificado. Existe o conhecimento de que foram afetadas algumas escolas do denominado “Plano dos Centenários”, o que é algo relevante, dado que todas as escolas de cada uma das tipologias deste tipo de edifícios de alvenaria foram construídas com o mesmo projeto. Contudo, aparentemente nenhuma destas escolas colapsou ou apresentou danos significativos nas paredes, que evidenciem uma importante resposta não linear, tendo somente apresentado alguns danos nos arcos, frontões e chaminés. Como este tipo de escola foi amplamente estudado no contexto do projeto PERSISTAH (Projetos de Escolas Resilientes aos Sismos no Território do Algarve e de Huelva), quer o seu comportamento linear, quer o não linear, e ainda existem muitas destas escolas por todo o Algarve, isso possibilita que seja determinada uma estimativa para o intervalo de acelerações a que foram sujeitas em 1969. Assim, foi realizada a análise linear detalhada de uma escola localizada num afloramento rochoso da Carrapateira, de modo a possibilitar a determinação de uma estimativa do limite inferior de aceleração de pico, assim como foi realizada a análise não linear da mesma escola, o que possibilitou a obtenção da estimativa do limite superior de aceleração de pico, que são apresentados neste trabalho.

Palavras-chave: Sismo de 1969; Escolas; Plano dos Centenários; Alvenaria; Algarve; PERSISTAH

1 INTRODUÇÃO

Tem sido evidente, um pouco por todo o mundo, o efeito dos sismos nos edifícios das escolas que foram construídas em alvenaria tradicional, principalmente quando foram sujeitas a alterações e ampliações ao longo da sua existência, designadamente com introdução de elementos estruturais em betão armado, muitas vezes sem que tenha existido qualquer preocupação em relação ao possível efeito da ação dos sismos. Um exemplo do mau comportamento sísmico deste tipo de edifícios, foi o colapso de uma escola em San Giuliano di Puglia após o sismo de Molise (Itália) de 2002 [1]. Isto deve servir de alerta para Portugal, e em particular para a região do Algarve, dado que esta foi a região continental onde ocorreram os últimos colapsos de edifícios de alvenaria, como consequência do sismo de 28 de fevereiro de 1969 [2].

O efeito dos sismos nas escolas tem sido alvo de estudo em países como a Itália [3, 4], onde existem construções em alvenaria tradicional de pedra com bastantes semelhanças ao observado em Portugal. Foi neste contexto que surgiu o projeto PERSISTAH (Projetos de Escolas Resilientes aos SISMos no Território do Algarve e de Huelva), no decorrer do qual foi estudado o comportamento sísmico de muitas escolas do ensino básico existentes na região do Algarve [5].

Presentemente, ainda existe muita incerteza sobre qual deverá ser o nível de ação sísmica a adotar na região do Algarve, atendendo aos estudos contraditórios que têm vindo a ser publicados. Um exemplo dessa contradição, são os resultados do projeto SHARE [6] por comparação com o nível de ação estipulado na NP EN 1998-1:2010 (EC8-1) [7], que são documentos com idades semelhantes.

Do ponto de vista científico, infelizmente não existem registos instrumentais que permitam perceber qual foi o nível de aceleração a que a região já foi sujeita no passado. Os registos instrumentais com os maiores valores de aceleração de pico que já foram registados no Algarve, foram obtidos na sequência da ocorrência do sismo de 17 de dezembro de 2009 ($M=6.0$, IPMA). Contudo, este sismo não teve os efeitos sobre o património construído que foram observados após o sismo de 1969 ($M=8.0$, IPMA), para o qual não existem registos intensos no Algarve, somente em Lisboa, no maciço Norte de amarração dos cabos de suspensão da “Ponte 25 de Abril”. Como é possível observar na Figura 1, estes dois sismos ocorreram nas duas zonas marítimas que tem apresentado a maior atividade sísmica ao longo das últimas décadas.

Assim, é da maior importância a análise sísmica de edifícios existentes em 1969, e que sobreviveram às vibrações sísmicas a que foram sujeitos. As escolas do denominado “Plano dos Centenários” constituem uma boa escolha de casos de estudo, atendendo ao elevado número destas construções de alvenaria de pedra ainda existentes no Algarve, designadamente porque foram construídas com base em projetos-tipo, pelo que apresentam elevada repetição de edifícios com as mesmas características dinâmicas.

Tal como é referido nos relatórios sobre o levantamento dos efeitos do sismo de 1969 no património então edificado no Algarve [2], as escolas do “Plano dos Centenários” apresentaram relativamente poucos danos, com alguma variabilidade na sua severidade, em função da sua localização. No caso das escolas da Carrapateira e da Bordeira, localizadas a relativa pouca distância entre si (a 221 km e 224 km do epicentro, respetivamente), foi evidente essa diferença. Eram ambas escolas primárias na altura do sismo (atualmente com outro tipo de utilização), que foram realizadas com base num projeto-tipo de escola primária do Algarve, da autoria do arquiteto Aberto Braga de Sousa [8], e possuíam uma única sala de aula, mas edificadas em terrenos de fundação muito distintos, o que terá condicionado a resposta sísmica de cada um dos edifícios.

A escola do “Plano dos Centenários” que se encontrava mais próxima do epicentro do sismo de 1969, estava localizada em Sagres, apresentando características construtivas semelhantes à da escola da Carrapateira, mas com duas salas de aula.

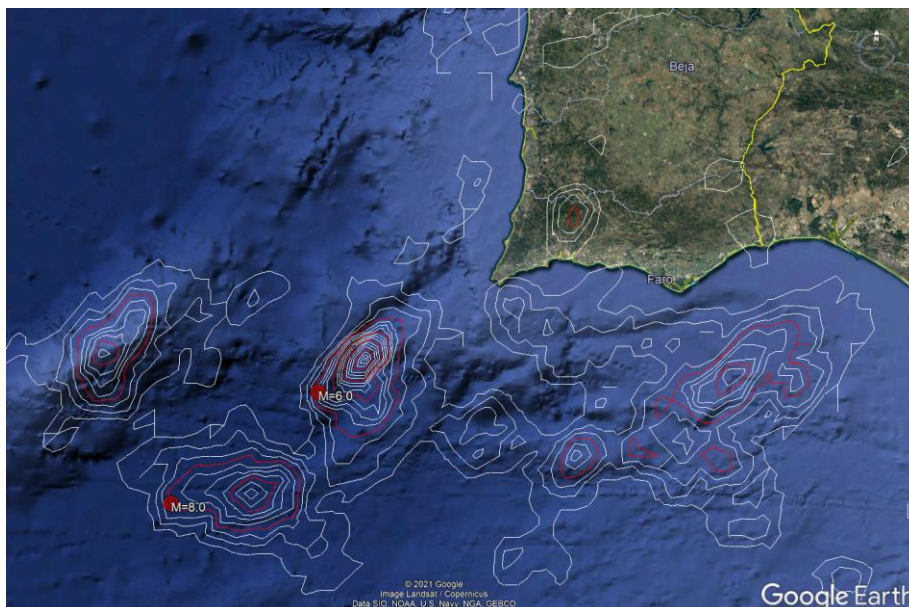


Figura 1. Isolinhas do número de sismos com $M \geq 2.5$ ocorridos num raio de 10.0883 km a partir de cada ponto (as isolinhas com menos de 4 sismos não foram representadas), registados entre 1961 e 2020 (IPMA), e localização dos epicentros dos sismos de 1969/02/28 ($M=8.0$) e de 2009/12/17 ($M=6.0$).

Neste contexto, neste trabalho é apresentado um estudo do comportamento sísmico de três antigas escolas primárias do “Plano dos Centenários” (localizadas na Carrapateira, Bordeira e Sagres), recorrendo a análises lineares e não lineares, o que possibilitou a obtenção de uma estimativa do intervalo de acelerações a que poderão ter sido sujeitas por efeito do sismo de 1969, e a correspondente comparação com os valores de registos que foram obtidos na rede KiK-Net do Japão, após a ocorrência de um sismo com magnitude idêntica à do sismo de 1969 ($M=8.0$), em locais localizados a distâncias epicentrais semelhantes às das escolas estudadas.

Paralelamente, também foram usados espectros de resposta resultantes de uma lei de atenuação estabelecida para a Europa [9], mas considerando unicamente situações de afloramento rochoso, para as quais os resultados estão próximos dos observados no registo do sismo ocorrido no Japão, acima referido.

2 Estimativa de acelerações resultantes do sismo de 1969 ($M=8$, IPMA)

2.1 Registos de um sismo no Japão com $M=8.0$

Após uma pesquisa nas principais bases de dados de registos instrumentais de sismos intensos, ficou evidente que não existem muitos registos de sismos com este nível de magnitude, o que realça a importância do sismo de 1969 no contexto da perigosidade sísmica da região do Algarve. Por outro lado, encontrar registos em terrenos rijos, com pequena amplificação associada a efeitos geológicos locais, juntamente com registos em terrenos brandos, com as distâncias epicentrais desejadas e com zona epicentral marítima, tornou a tarefa de recolha de informação ainda mais difícil. Assim, a única rede sísmica consultada que conseguiu cumprir com estes requisitos, foi a rede KiK-net localizada no Japão, onde foi possível encontrar um sismo que reunia todas as condições atrás referidas. Esse sismo ocorreu ao largo do Japão a 26 de setembro de 2003, com magnitude $M=8$. Uma das vantagens da rede KiK-net, reside no facto de existirem dois aparelhos de registo em cada localização, um posicionado à superfície, e outro em profundidade, o que permite uma melhor avaliação do grau de amplificação observado em cada local de registo.

Foram procuradas estações apresentando distâncias epicentrais semelhantes às do local do registo obtido na “Ponte 25 de Abril” (338 km), da escola da Bordeira (224 km), da escola da Carrapateira (221 km), e da escola de Sagres (206 km). Os resultados das estações escolhidas, que apresentavam as acelerações mais baixas e mais elevadas na proximidade das distâncias pretendidas, estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Estações da rede KiK-net escolhidas, com indicação das velocidades médias das ondas de corte nos 30 m superficiais ($v_{s,30}$), para comparação de valores de aceleração de pico medidos à superfície (a_g), com base nos registos do sismo ocorrido no Japão em 2003/09/26, com $M=8$.

Estação KiK-net	Distância epicentral (km)	$v_{s,30}$ (m/s)	a_g (m/s ²)
HYMH03	340	602.7	0.054
AOMH09	338	261.0	0.215
KKWH12	226	771.2	0.334
ABSH13	224	463.6	1.304
NMRH02	223	315.4	5.141
KKWH14	219	537.5	1.164
IBUH03	206	111.1	3.765
IBUH02	201	541.8	0.599

2.2 As escolas do “Plano dos Centenários” da Carrapateira e da Bordeira

A antiga escola primária da Carrapateira está edificada em cima de um afloramento rochoso de xisto (Figura 2). De acordo com a informação da Câmara Municipal de Aljezur, que está atualmente na entrada do edifício, esta antiga escola primária foi construída na década de 40 do século XX. A arquitetura da antiga escola primária da Bordeira (Aljezur, Algarve) é idêntica à da escola da Carrapateira (Aljezur, Algarve) [2].



Figura 2. Antiga escola primária da Carrapateira (Aljezur, Algarve).

Em 1969, estas antigas escolas primárias tiveram desempenhos muito diferentes. A escola da Carrapateira, localizada num afloramento rochoso de xisto, teve danos muito ligeiros, essencialmente localizados na ligação entre os arcos traseiros e a sala de aula, enquanto a escola da Bordeira, localizada num vale aluvionar junto ao leito de uma ribeira, apresentou danos muito mais extensos, com queda do frontão existente sobre a entrada principal [2]. Deste modo, o desempenho sísmico destas duas escolas constitui uma forma de estimar o nível de aceleração a que foram sujeitas. Para tal, foi realizado um conjunto de análises sísmicas, lineares e não lineares, dos edifícios em questão.

Em relação às análises lineares, foi utilizado o programa SAP2000 [10]. Quanto às características mecânicas dos materiais, foram usados os valores médios apresentados nas normas italianas [11, 12], tal como foram adotados em outros estudos realizados para o Algarve [13], e tendo por base os resultados de ensaios realizados com alvenaria de pedra calcária da região [14]. Estes valores também serviram de base às análises sísmicas estáticas não lineares, recorrendo ao programa Tremuri [15], para a determinação das curvas de capacidade [16]. Em seguida, foi adotado o procedimento desenvolvido no âmbito do projeto PERSISTAH, por forma a avaliar a resposta sísmica de um edifício sujeito à ação de um qualquer espectro de resposta [17].

No contexto das análises lineares das escolas da Carrapateira e da Bordeira, foram utilizados os registos obtidos na estação KKWH12 (Tabela 1), por apresentarem baixos níveis de amplificação local (é quase rocha, logo à superfície) e terem sido registados a uma distância epicentral que se enquadra na localização relativa das escolas em relação ao sismo de 1969. O modelo estrutural implementado no SAP2000, assim como os resultados das tensões obtidas da análise linear (SAP2000), e as curvas de capacidade obtidas da análise não linear (Tremuri [15]), estão apresentados na Figura 3.

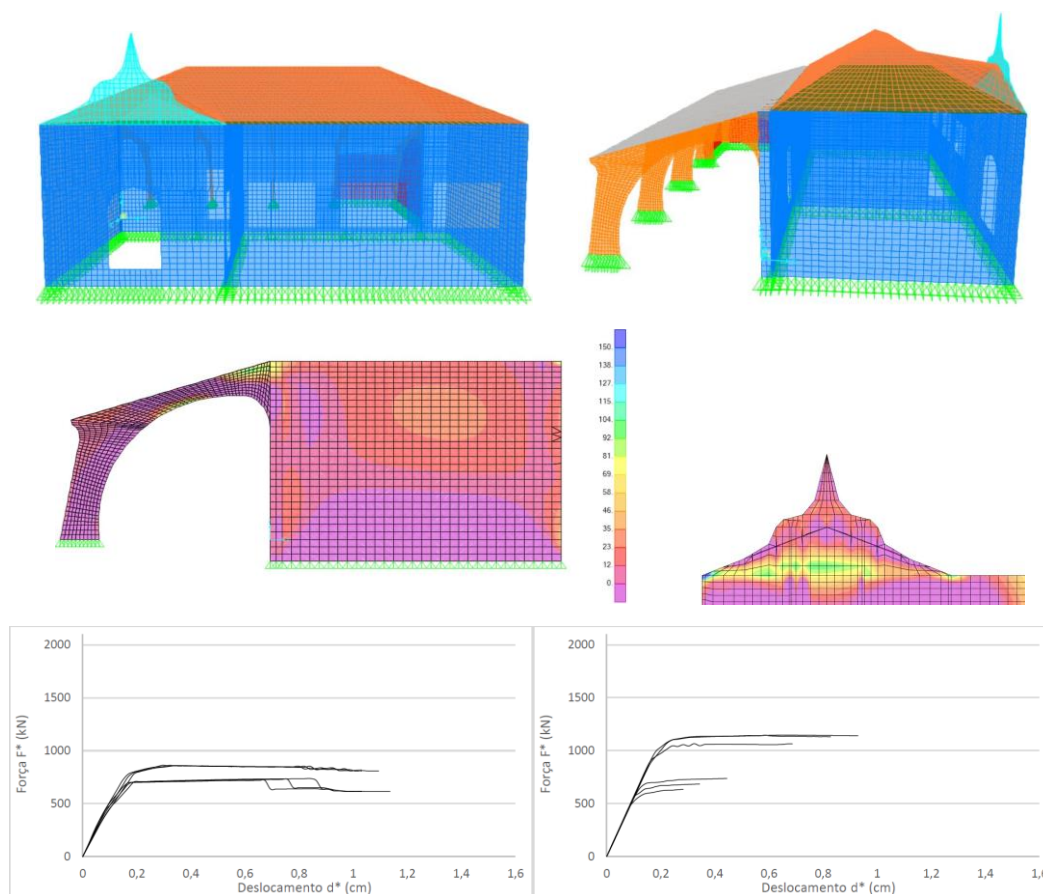


Figura 3. Modelo estrutural (SAP2000) da antiga escola primária da Carrapateira (Aljezur, Algarve), e respetivos resultados, e curvas de capacidade obtidas com o Tremuri.

Para que fosse possível obter uma estimativa do previsível intervalo de acelerações a que as escolas foram sujeitas, foi necessário estimar qual o valor mínimo de tensão que poderá originar fendilhação na argamassa (à base de cal) que constitui o reboco deste tipo de edifício de alvenaria tradicional. De acordo com os cadernos de encargos dos processos das escolas do “Plano dos Centenários” a que foi possível ter acesso, a alvenaria de pedra era construída com argamassa de cal aérea e areia ao traço 1:3, ou cal hidráulica e areia ao traço 1:4. Na bibliografia consultada sobre o assunto, existem diversos valores de resistência à flexão para este tipo de reboco, resultantes de testes realizados, designadamente com valores compreendidos entre 0.2 e 0.8 MPa para a argamassa à base de cal aérea [18], e entre 0.2 e 0.6 MPa para a cal hidráulica [19].

Por outro lado, foi usado o espectro de resposta obtido com uma lei de atenuação [9] (com fonte pontual) para estimar o nível de aceleração que origina um deslocamento correspondente ao do estado limite de limitação de danos (DL), tal com é definido na NP EN 1998-3:2017 [20].

Dos resultados das análises lineares realizadas com os registos do Japão, foi possível estimar uma aceleração mínima de 0.41 m/s^2 para originar tensões de tração de 0.2 MPa nos arcos das escolas da Carrapateira e da Bordeira, de modo a originarem os danos observados em 1969 [2]. Em relação à escola da Bordeira, foram obtidos os esforços resultantes da ação sísmica na base do frontão (através de um *section cut*), o que possibilitou a estimativa do valor mínimo de aceleração de pico necessária para derrubar o frontão (admitindo uma resistência à tração de 0.2 MPa), tendo em conta o conteúdo espectral do sismo registado do Japão (com $M=8$), e correspondeu a 0.78 m/s^2 .

Com base nas análises não lineares realizadas, também foi possível estimar a aceleração de pico necessária para se atingir o estado limite DL. Para a escola da Carrapateira, e com base no espectro de resposta da lei de atenuação, foi estimado um valor de 2.03 m/s^2 . Com base no conteúdo espectral estipulado para o sismo tipo 1 da NP EN 1998-1:2010, num terreno tipo A, foi possível estimar uma aceleração de pico de 1.41 m/s^2 . Estes valores podem ser entendidos como correspondendo aos limites superiores de aceleração de pico a que esta construção poderá ter sido sujeita em 1969.

2.3 A escola do “Plano dos Centenários” de Sagres

A antiga escola primária de Sagres (Figura 4) também corresponde a uma escola do “Plano dos Centenários” da autoria do arquiteto Alberto Braga de Sousa [16].

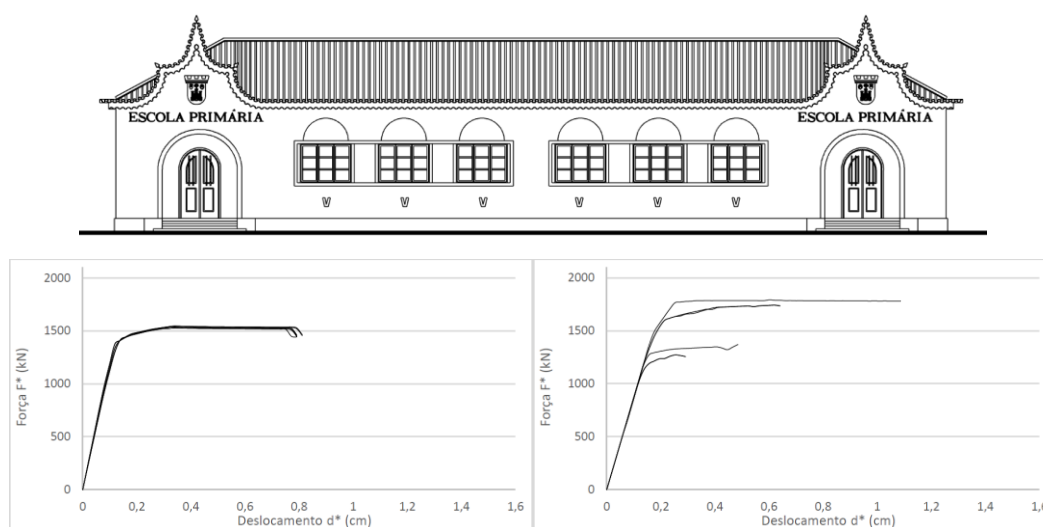


Figura 4. Antiga escola primária de Sagres (Vila do Bispo, Algarve), e correspondentes curvas de capacidade obtidas com o Tremuri.

Atendendo aos resultados das análises não lineares realizadas, foi possível estimar as seguintes acelerações de pico necessárias para se atingir o estado limite DL nesta escola: 2.14 m/s^2 , com base no conteúdo espectral da lei de atenuação; 1.55 m/s^2 , com base no espectro de resposta estipulado na NP EN 1998-1:2010 para o sismo tipo 1, num terreno tipo A.

3 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Provavelmente, é importante o estudo aprofundado dos efeitos do sismo de 1969, designadamente com vista à calibração da ação sísmica para Portugal continental, e em particular para o Algarve, que foi a região onde os efeitos foram mais graves, originando o colapso de diversas construções. Contudo, é difícil distinguir os efeitos que resultaram de elevados níveis de vibração a que as construções foram sujeitas, ou de, simplesmente, de uma elevada vulnerabilidade das construções mais atingidas. Se observarmos os valores de aceleração de pico que constam na Tabela 1, é evidente a elevada variabilidade de valores para distâncias epicentrais da mesma ordem de grandeza, em resultado dos diferentes níveis de amplificação observados em cada local de registo. É muito vulgar esse efeito superar o efeito da atenuação das vibrações com a distância. Este mesmo tipo de efeito ficou evidente em consequência do sismo de 1969, como pôde ser constatado da observação do comportamento das escolas que foram executadas com projetos-tipo, como foi o exemplo das antigas escolas primárias da Carrapateira e da Borda [2].

Pese embora a grande incerteza inerente ao tipo de estudo aqui apresentado, em face da elevada variabilidade dos conteúdos espectrais das ações sísmicas, e das características mecânicas dos materiais que constituem os edifícios analisados, os resultados obtidos apresentam alguma coerência entre si.

Da observação dos valores da Tabela 1, e ignorando os registos claramente desviantes, é possível estimar que as acelerações para distâncias semelhantes à da localização relativa da escola da Carrapateira em relação ao epicentro do sismo de 1969, estejam compreendidas entre 0.3 e 1.3 m/s^2 . Com base nas análises sísmicas realizadas, foi possível estimar valores para os limites inferiores que estão enquadrados neste intervalo, com 0.41 m/s^2 para a antiga escola da

Carrapateira (afloramento rochoso de xisto), e de 0.78 m/s^2 para a antiga escola da Bordeira (aluvião). Das análises não lineares realizadas, é possível concluir que, muito provavelmente, não foram ultrapassadas acelerações de pico de 1.41 m/s^2 , ou, no máximo, de 2.03 m/s^2 , dependendo do conteúdo espectral do sismo, dado que se verificou que a forma do espectro de resposta influencia muito os resultados das análises.

Em relação a Sagres, os valores obtidos foram ligeiramente superiores. Por um lado, porque a distância epicentral é inferior, por outro, porque essa escola é um pouco menos vulnerável.

4 CONCLUSÕES

O trabalho realizado permitiu obter um intervalo de valores relativos às prováveis acelerações de pico a que as antigas escolas primárias da Carrapateira, Bordeira e Sagres foram sujeitas em consequência do sismo ocorrido em 1969.

Foi possível constatar uma grande variabilidade de resultados, fruto das características dos terrenos de fundação e das formas dos espectros de resposta, pelo que devem ser fatores a ter em conta na avaliação da segurança sísmica de construções existentes.

Em função dos resultados preliminares obtidos neste trabalho, será desejável a realização de estudos numéricos mais aprofundados sobre os efeitos do sismo de 1969 nos diversos tipos de construções existentes então no Algarve, designadamente em estruturas de betão armado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao programa INTERREG-POCTEP Espanha-Portugal e ao Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) pelo apoio financeiro através do projeto 0313_PERSISTAH_5_P.

REFERÊNCIAS

- [1] Augenti, N., Cosenza, E., Dolce, M., Manfredi, G., Masi, A., Samela, L. (2004). Performance of School Buildings during the 2002 Molise, Italy, Earthquake. *Earthquake Spectra* 20:S257-S70. <https://doi.org/10.1193/1.1769374>.
- [2] Marécos, J.A.E., Castanheta, M.C.N. (1970). Estudo do comportamento de estruturas sob a acção do sismo de 28 de Fevereiro de 1969. Lisbon: Laboratório Nacional de Engenharia Civil. p. 1-24.
- [3] Di Ludovico, M., Digrisolo, A., Moroni, C., Graziotti, F., Manfredi, V., Prota, A. et al. (2018). Remarks on damage and response of school buildings after the Central Italy earthquake sequence. *Bulletin of Earthquake Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0332-x>
- [4] O'Reilly, G.J., Perrone, D., Fox, M., Monteiro, R., Filiatrault, A. (2018). Seismic assessment and loss estimation of existing school buildings in Italy. *Engineering Structures* 168:142-62. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.056>.
- [5] Estêvão, J.M.C., Ferreira, M.A., Braga, A., Carreira, A., Barreto, V., Requena-García-Cruz, M. et al. (2019). Projetos de escolas resilientes aos sismos no território do Algarve e de Huelva (PERSISTAH). 11ª Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica (Sísmica 2019). Lisboa: IST. p. 1-12.
- [6] Woessner, J., Laurentiu, D., Giardini, D., Crowley, H., Cotton, F., Grünthal, G. et al. (2015). The 2013 European Seismic Hazard Model: key components and results. *Bulletin of Earthquake Engineering* 13:3553-96. <https://doi.org/10.1007/s10518-015-9795-1>.
- [7] IPQ (2010). NP EN 1998-1. Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios. Caparica, Portugal: Instituto Português da Qualidade.
- [8] Ribeiro, V. (2016). As escolas primárias dos Centenários: Subsídios para uma história das construções escolares no Algarve. Apontamentos para a história das culturas de escrita : da idade do ferro à era digital. Faro: Universidade do Algarve. p. 289-311.
- [9] Ambraseys, N.N., Douglas, J., Sarma, S.K., Smit, P.M. (2005). Equations for the Estimation of Strong Ground Motions from Shallow Crustal Earthquakes Using Data from Europe and the Middle East: Horizontal Peak Ground Acceleration and Spectral Acceleration. *Bulletin of Earthquake Engineering* 3:1-53. <https://doi.org/10.1007/s10518-005-0183-0>.
- [10] Computers & Structures, I. (2015). SAP 2000 – Structural Software for Analysis and Design. V18. Berkeley.
- [11] NTC (2018). Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni». Roma: Ministero delle infrastrutture e dei trasporti.
- [12] NTC (2019). Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018. Roma: Ministero delle infrastrutture e dei trasporti.

- [13] Estêvão, J., Tomás, B., Laranja, R., Braga, A. (2021). Seismic Retrofitting of an Existing Masonry School Building: A Case Study in Algarve. In: Rodrigues H, Gaspar F, Fernandes P, Mateus A, editors. Sustainability and Automation in Smart Constructions. Cham: Springer International Publishing. p. 349-55. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35533-3_42
- [14] Cabral, P., Braga, A., Estêvão, J.M.C. (2014). Caracterização mecânica da alvenaria tradicional de pedra do Algarve. 5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas / Encontro Nacional Betão Estrutural 2014 / 9º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica. Lisboa: LNEC. p. 1-13, CD56.
- [15] Lagomarsino, S., Penna, A., Galasco, A., Cattari, S. (2013). TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings. Engineering Structures 56:1787-99. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.08.002>.
- [16] Estêvão, J.M.C., Tomás, B. (2021). Ranking the Seismic Vulnerability of Masonry School Buildings according to the EC8-3 by Using Performance Curves. International Journal of Architectural Heritage:1-16. <https://doi.org/10.1080/15583058.2021.1904458>.
- [17] Estêvão, J.M.C. (2019). An integrated computational approach for seismic risk assessment of individual buildings. Applied Sciences 9:5088. <https://doi.org/10.3390/app9235088>.
- [18] Veiga, R. (2017). Air lime mortars: What else do we need to know to apply them in conservation and rehabilitation interventions? A review. Construction and Building Materials 157:132-40. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.080>.
- [19] Pavía, S., Hanley, R. (2010). Flexural bond strength of natural hydraulic lime mortar and clay brick. Materials and Structures 43:913-22. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9555-2>.
- [20] IPQ (2017). NP EN 1998-3. Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 3: Avaliação e reabilitação de edifícios (in Portuguese). Caparica, Portugal: Instituto Português da Qualidade.